



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑩ **Offenlegungsschrift**  
**DE 197 38 070 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 J 37/05**  
H 01 J 37/26  
G 21 K 1/08

②1 Aktenzeichen: 197 38 070.0  
②2 Anmeldetag: 1. 9. 97  
④3 Offenlegungstag: 4. 3. 99

DE 197 38 070 A 1

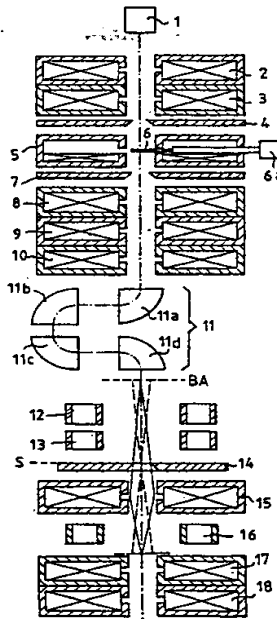
⑦1 Anmelder:  
Leo Elektronenmikroskopie GmbH, 73447  
Oberkochen, DE

⑦2 Erfinder:  
Benner, Gerd, Dr., 73434 Aalen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Energiefilter, insbesondere für ein Elektronenmikroskop

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Energiefilter (11-16) insbesondere für Elektronenmikroskope, bei dem die Einstellung unterschiedlicher Energiebandbreiten elektronenoptisch erfolgt. Dafür sind am Filterausgang ein oder mehrere Ablenssysteme (12, 13) und ein oder mehrere Transferlinsen (15) vorgesehen. Bei einem Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Dispersionsebene eine Blendenanordnung (14) angeordnet, die eine Öffnung mit einem abgestuften Randbereich aufweist. Durch Auslenkung des Elektronenstrahls können Spaltblenden mit unterschiedlichen Spatllängen simuliert werden. Die durch das oder die Ablenssysteme bewirkte Auslenkung des Elektronenstrahls senkrecht zur dispersiven Richtung des Filters wird durch eine nachfolgende Transferlinse (15) oder ein weiteres Ablenssystem (16) wieder kompensiert, so daß auch eine Bildverschiebung kompensiert ist. Bei einem zweiten Ausführungsbeispiel sind in zwei zueinander konjugierten Spektrumsebenen jeweils eine Spaltkante angeordnet. Durch ein jeder Spaltkante vorgeschaltetes Ablenssystem werden je nach Erregung der Ablenssysteme unterschiedliche Spektrumteile von den beiden Spaltkanten herausgefiltert. Bei diesem Ausführungsbeispiel kann die Energiebandbreite kontinuierlich geändert werden.



DE 197 38 070 A 1

97037 P

Abbildende Energiefilter für Elektronenmikroskope sind beispielsweise aus der US-A 4,812,652, US-A 4,740,704, US-A 4,740,261 und US-A 5,449,914 bekannt. Diese Energiefilter weisen an ihrem Ausgang stets zwei ausgezeichnete Ebenen, die achromatische Bildebene und die Spektrums-ebene auf, deren Abstand die sogenannte Helmholtzlänge ist und ca. 50 mm–70 mm beträgt. In der achromatischen Bildebene werden alle Strahlen unabhängig von ihrer Energie fokussiert, die von einem gemeinsamen Punkt des Objektes oder des Beugungsbildes ausgehen. Man spricht deshalb auch von einer Ortsfokussierung in der achromatischen Bildebene. In der Spektrumsebene werden dagegen die Strahlen gleicher Energie in einem Punkt fokussiert, so daß in energiedispersiver Richtung ein Spektrum des Elektronenstrahles entsteht. Man spricht deshalb in der Spektrumsebene auch von einer Energiefokussierung. Mit Hilfe eines Projektivsystems, bestehend aus einer Transferlinse und mindestens einer Projektivlinse kann entweder die achromatische Ebene oder die Spektrumsebene auf die Registrierebene, in der ein Leuchtschirm oder ein Elektronendetektor angeordnet ist, abgebildet werden. Mit einer in der Spektrumsebene angeordneten Schlitzblende, die in energiedispersiver Richtung eine definierte Breite aufweist, läßt sich ein Energiefenster für die Abbildung auswählen. Die Breite des Energiefensters ist dabei von der Anwendung abhängig. Für eine elastische Hellfeldabbildung und für die Energieverlustabbildung sind Energiebandbreiten im Bereich von 4–25 eV sinnvoll. Für eine Paralleldetektion eines Spektrums sollte ein Energiebereich von 50 eV bis 500 eV auswählbar sein.

In der US-A 4,812,652 ist zur Einstellung unterschiedlicher Energiebandbreiten in der Spektrumsebene eine Anordnung mit zwei Spaltkanten, die mechanisch gegeneinander bewegbar sind, vorgesehen. Mit dieser Anordnung lassen sich im Prinzip beliebige Spaltbreiten einstellen. Allerdings erfordert die symmetrische und parallele Bewegung der Spaltbacken eine aufwendige Mechanik. Und aufgrund der mechanischen Hystereseeffekte ist eine automatische reproduzierbare Einstellung der Energiebandbreite nur mit Hilfe einer Messung der Spaltbreite möglich. Da außerdem konstruktionsbedingt die beiden Spaltkanten in unterschiedlichen Ebenen angeordnet sein müssen, treten bei kleinen Energiebandbreiten Abschattungseffekte auf.

Alternativ ist es denkbar, auf einem in der Spektrumsebene angeordneten Blendenwechsler mehrere Spaltblenden unterschiedlicher Breite vorzusehen. Die Herstellung entsprechender Spaltblenden mit festen Spaltabmessungen ist relativ einfach und entsprechend billig. Allerdings erfordert die Variation der Energiebandbreite ein mechanisches Wechseln der Spaltblende durch den Blendenwechsler. Dadurch ist die Anzahl der auswählbaren Energiebandbreiten stark eingeschränkt. Und aufgrund der erforderlichen Positioniergenauigkeit von einem  $\mu\text{m}$  ist hier eine Automatisierung der Energiebandbreiteneinstellung sehr aufwendig.

Aus der US 5,013,913 und US 5,483,073 des Erfinders sind bereits Transmissionselektronenmikroskope bzw. Rasterelektronenmikroskope bekannt, bei denen die Einstellung unterschiedlicher Aperturblenden oder Leuchtfeldblenden durch elektronenoptische Auswahl einer geeigneten Blendenöffnung erfolgt. Dazu ist im Elektronenmikroskop jeweils eine Blende mit einer Vielzahl runden Blendenöffnungen mit unterschiedlichen Öffnungsdurchmessern angeordnet. Die Auswahl bzw. Einstellung auf eine Blende mit einem definierten Blendendurchmesser erfolgt durch Auslenkung und anschließende Rücklenkung des Elektronenstrahls. Im Unterschied zu den Bedingungen am ausgangsseitigen Ende eines Energiefilters steht jedoch im beleuch-

tungsseitigen Strahlengang viel mehr Platz zur Anordnung der Ablensysteme zur Verfügung.

Ziel der vorliegenden Erfindung ist ein abbildendes Elektronen-Energiefilter, bei dem eine Umschaltung auf unterschiedliche Energiebandbreiten ohne mechanischen Justieraufwand des Bedieners erfolgen kann. Dieses Ziel wird durch ein Energiefilter mit den Merkmalen des Anspruchs 1 erreicht. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

Das erfindungsgemäße Energiefilter weist zur Energieselektion eine Blendenanordnung in der Dispersionsebene oder einer zur Dispersionsebene konjugierten Ebene und mindestens ein der Blendenanordnung vorgeschaltetes Ablensystem, welches eine Ablenkung des Elektronenstrahls bewirkt, auf. Die Einstellung unterschiedlicher Energiebandbreiten erfolgt durch unterschiedliche Erregung des Ablensystems und daraus resultierende unterschiedliche Auslenkung des Elektronenstrahls relativ zur Blendenanordnung.

Die Einstellung der Energiebandbreite erfolgt beim erfindungsgemäßen Filter elektronenoptisch, wodurch jeglicher mechanischer Justieraufwand beim Wechsel der Energiebandbreite entfällt. Es braucht lediglich die Erregung des Ablensystems und ggf. weiterer Ablensysteme zur Rücklenkung des Elektronenstrahls zur optischen Achse beim Wechsel der Energiebandbreite geändert zu werden. Die Blendenanordnung selbst bleibt dabei relativ zur optischen Achse und relativ zum mechanischen Aufbau des Elektronenmikroskops ortsfest. Die Werte der unterschiedlichen Erregungen des Ablensystems bzw. der Ablensysteme können bei der ersten Inbetriebnahme des Gerätes empirisch ermittelt und abgespeichert sein. Beim späteren Betrieb des Gerätes wird dann auf diese abgespeicherten Werte zurückgegriffen, indem die Erregung des Ablensystems bzw. der Ablensysteme je nach gewünschtem Energiebereich auf die zugehörigen abgespeicherten Werte eingestellt wird.

Die Einstellung auf unterschiedliche Energiebandbreiten erfolgt durch Auslenkung senkrecht zur energiedispersiven Richtung des Filters. Zu dieser Auslenkung reicht ein eindimensionales – eine Ablenkung in nur einer Richtung bewirkendes – Ablensystem aus, wenn gleichzeitig bei einer Änderung der Auslenkung auch die Erregung der dispersiven Elemente des Energiefilters geringfügig geändert wird, dadurch geringfügige Fehljustierungen zwischen der senkrechten zur energiedispersiven Richtung und der Ablenkrichtung des Ablensystems kompensiert werden können. Die dazu erforderliche relative Änderung der Erregung der dispersiven Elemente kann dabei kleiner als 1% sein, so daß diese Erregungsänderung keinen spürbaren Einfluß auf die Dispersion hat.

Zur Energieselektion können auf einer Blendenscheibe mehrere spaltförmige Öffnungen mit unterschiedlichen Spaltlängen vorgesehen sein, die durch schmale Zwischenstege voneinander getrennt sind. Die Stegbreite sollte jedoch maximal 10% der Spaltbreite betragen. Alternativ kann die Blendenanordnung nur eine einzige Öffnung mit abgestuften Rand aufweisen, die in Abhängigkeit von der Position senkrecht zur energiedispersiven Richtung unterschiedliche Öffnungslängen in energiedispersiver Richtung aufweist. Mit einer solchen Blendenanordnung ergibt sich eine größere Anzahl an einstellbaren Energiebandbreiten, da die unterschiedlichen Spaltlängen durch Auswahl unterschiedlicher Bereiche ein und der selben Öffnung ausgewählt werden.

Bei einem einfachen Ausführungsbeispiel der Erfindung erfolgt die Auslenkung um einen realen oder virtuellen Kipunkt, der mit dem Schnittpunkt der optischen Achse mit der Ausgangsbildebene des Filters zusammenfällt. Mit Hilfe

einer der Blendenanordnung nachgeschalteten Transferlinse, die die Ausgangsbildebene des Filters in eine dazu konjugierte Ebene abbildet, wird erreicht, daß die zentrale Lage der achromatischen Ebene erhalten bleibt. Es findet demzufolge keine Bildauswanderung in Abhängigkeit von der gewählten Energiebandbreite statt. Für die Auslenkung reicht dann, wenn die achromatische Bildebene in Strahlrichtung gesehen weit genug hinter den dispersiven Komponenten des Filters liegt und demzufolge ein Ablenkensystem in der achromatischen Bildebene angeordnet werden kann, ein einzelnes Ablenkensystem in der achromatischen Bildebene aus. Liegt die achromatische Bildebene jedoch zu nahe an den dispersiven Elementen – und ist deshalb für ein Ablenkensystem nicht zugänglich, ist ein Doppelablenksystem erforderlich, dessen beiden Komponenten derart erregt werden, daß die Ablenkung um einen virtuellen Kippunkt in der achromatischen Bildebene erfolgt. Nachteilig ist an dieser Anordnung jedoch, daß sowohl die Transferlinse als auch die nachfolgenden Linsen für die weitere Abbildung je nach ausgewählter Energiebandbreite unterschiedlich stark außeraxial durchstrahlt werden, so daß unter Umständen von der ausgewählten Energiebandbreite abhängige Bildfehler auftreten können.

Das Problem der von der ausgewählten Energiebandbreite abhängigen Abbildungsfehler läßt sich gemäß eines weiterhin bevorzugten Ausführungsbeispiels dadurch umgehen, daß vor der Blendenanordnung ein Doppelablenksystem und der Transferlinse ein weiteres einfaches Ablenkensystem nachgeschaltet ist. Die beiden Elemente des Doppelablenksystems werden dabei in Kombination stets so erregt, daß der Elektronenstrahl unabhängig von der ausgewählten Energiebandbreite und damit unabhängig von der Position auf der Blendenanordnung stets zentral durch die Transferlinse verläuft. Die hinter der Transferlinse verbleibende Bildauslenkung wird dann durch das einfache Ablenkensystem so kompensiert, daß in der Bildebene der Transferlinse keine Bildverschiebung auftritt. Demzufolge tritt auch bei den nachfolgenden Abbildungsstufen keine von der ausgewählten Energiebandbreite abhängige außeraxiale Durchstrahlung auf.

Alternativ ist das Problem der von der ausgewählten Energiebandbreite abhängigen Bildfehler auch dadurch umgekehrbar, daß drei einfache Ablenkensysteme vor der Transferlinse angeordnet sind, von denen eines eine Kippung in der Spektrumsebene bewirkt. Das der Spaltanordnung vorgeschaltete Ablenkensystem bewirkt eine Auslenkung des Elektronenstrahls von der optischen Achse, das in der Spektrumsebene angeordnete Ablenkensystem eine Rücklenkung zur optischen Achse und das nachfolgende Ablenkensystem eine weitere Kippung derart, daß der Elektronenstrahl nachfolgend zentrisch zur optischen Achse verläuft.

Bei einem Ausführungsbeispiel, bei dem die Energiebandbreite kontinuierlich einstellbar ist, sind zwei Blendenanordnungen in zwei konjugierten Ebenen angeordnet. Beide Blendenanordnungen können dabei aus einfachen Spaltkanten bestehen. Zwischen beiden Blendenebenen ist in einer zur achromatischen Bildebene konjugierten Ebene ein Ablenkensystem vorgesehen. Mit dem der ersten Blendenanordnung vorgeschalteten Ablenkensystem wird der Elektronenstrahl so ausgelenkt, daß entweder der obere oder der untere Teil des Spektrums durch die Blendenanordnung abgeschnitten wird. Durch das zweite Ablenkensystem wird dann der Elektronenstrahl wiederum so ausgelenkt, daß durch die zweite Blendenanordnung die Energiefilterung am entgegengesetzten Ende des Spektrums erfolgt.

Nachfolgend werden Einzelheiten der Erfindung anhand der in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher

erläutert. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1a den Schnitt durch ein Transmissionselektronenmikroskop mit einem Energiefilter nach einem ersten Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung;

Fig. 1b eine Detaildarstellung des Strahlenganges am Ausgang des Energiefilters beim Ausführungsbeispiel nach Fig. 1a in einer zur Fig. 1a senkrechten Ebene;

Fig. 1c eine Detaildarstellung des Strahlenganges am Ende des Energiefilters für ein vereinfachtes Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 2 eine Aufsicht auf eine Blendenanordnung bei den Energiefiltern nach den Fig. 1a–1c;

Fig. 3 eine Detaildarstellung des Strahlenganges im hinteren Teil des Energiefilters für ein weiteres Ausführungsbeispiel der Erfindung;

Fig. 4a und 4b Prinzipskizzen des Strahlenganges im hinteren Teil des Energiefilters für ein erstes Ausführungsbeispiel mit kontinuierlich einstellbarer Energiebandbreite und

Fig. 5a und 5b die Prinzipskizze des Strahlenganges im hinteren Teil des Energiefilters für ein zweites Ausführungsbeispiel mit kontinuierlich einstellbarer Energiebandbreite.

Der obere Teil des in der Fig. 1a dargestellten Transmissionselektronenmikroskops weist einen konventionellen, aus der US 4 812 652 bekannten Aufbau auf. Die Elektronenquelle ist mit (1) bezeichnet. Mittels eines der Elektronenquelle (1) nachgeschalteten zweistufigen Kondensors (2, 3) wird aus den aus der Elektronenquelle (1) austretenden Elektronen ein kollimierter Elektronenstrahl erzeugt, dessen Apertur durch den Öffnungsdurchmesser der Aperturblende (4) bestimmt ist. Mit diesem kollimierten Elektronenstrahl wird das im Polschuhspalt des Objektivs (5) positionierte Objekt (6) beleuchtet. Für eine Manipulation des Objektes (6) ist dieses auf einem durch die Objektivlinse (5) hindurchgeführten Manipulator (6a) angeordnet.

Mittels drei der Objektivlinse (5) nachgeschalteten, ebenfalls als Magnetlinsen ausgebildeten Abbildungsstufen (8, 9, 10) wird ein vergrößertes Bild des Objektes (6) oder des Beugungsdiagrammes des Objektes (6) in der nicht dargestellten Eingangsbildebene des Energiefilters (11–16) erzeugt. Die Größe des übertragenen Bildfeldes wird dabei durch den Öffnungsdurchmesser der dem Objektiv (5) nachgeschalteten Feldblende (7) bestimmt.

Die Abbildungsbedingungen vor dem Eintritt in das Energiefilter (11–16) entsprechen dabei den in der US-A 4 812 652 beschriebenen Abbildungsbedingungen, so daß unabhängig von der eingestellten Vergrößerung bei der Objektabbildung ein Bild des Objektes in der Eingangsbildebene des Filters (11–16) und ein Bild der Elektronenquelle (1) in der Eingangs-Crossover-Ebene des Filters (11–16) liegt. Bei der Aufnahme von Objektbeugungsdiagrammen liegt ein Bild der Elektronenquelle (1) in der Eingangsbildebene des Energiefilters (11–16) und ein Bild des Objektes (6) in der Eingangs-Crossover-Ebene des Energiefilters (11–16). In der Eingangsbildebene oder nahe der Eingangsbildebene ist eine die Ausdehnung der Kautik begrenzende, nicht dargestellte Feldblende angeordnet, deren Öffnungsdurchmesser so gewählt ist, daß die Registrierfläche des Detektors voll ausgeleuchtet wird.

Die dispersiven Komponenten (11, 11a–11d) des Energiefilters sind als sogenanntes Omegafilter entsprechend der US 4 740 704 oder entsprechend der US 5 449 914 aufgebaut. Die dispersiven Komponenten des Filters bilden die Eingangsbildebene achromatisch in die Ausgangsbildebene (BA) und die Eingangs-Crossover-Ebene dispersiv in die Spektrumsebene (S) ab. Der hintere Teil des Energiefilters ist dabei in der Fig. 1 aus Übersichtlichkeitsgründen entlang der optischen Achse stark verlängert dargestellt; in der Realität liegt die Ausgangsbildebene (achromatische Bildebene)

(BA) etwa in der Mitte des letzten Sektormagneten (11d) des Filters und die Spektrumsebene (S) in einem Abstand hinter dem letzten Sektormagneten (11d), welcher der Größenordnung des Umlenkradius in den Sektormagneten (11a–11d) entspricht.

Der ausgangsseitige Teil des Energiefilters enthält zwischen der achromatischen Bildebene (BA) und der Spektrumsebene (S) ein Doppelablenksystem (12, 13), dessen Komponenten jeweils als eindimensionale – eine Ablenkung in nur einer Richtung bewirkende – Ablenkensysteme ausgebildet sind, und in der Spektrumsebene eine Blendenanordnung (14). Hinter der Spektrumsebene (S) folgt in Strahlrichtung gesehen eine Transferlinse (15) und ein weiteres einfaches Ablenkensystem (16). Das Doppelablenksystems (12, 13) bewirkt in Abhängigkeit von der einzustellenden Energiebandbreite senkrecht zur dispersiven Richtung des Filters, d. h. senkrecht zur Zeichenebene in Fig. 1a eine Auslenkung des Elektronenstrahls derart, daß der Elektronenstrahl in der Spektrumsebene auf den die gewünschte Energiefilterung bewirkenden Bereiche der Blendenanordnung fällt, und gleichzeitig, unabhängig von der gewählten Energiebandbreite stets zentral durch die Transferlinse (15) verläuft. Durch diese Wahl der Ablenkung durch das Doppelablenksystem (12, 13) wird erreicht, daß die Transferlinse (15) keine von der eingestellten Energiebandbreite abhängigen Fehler erzeugt. Die Transferlinse (15) ist so erregt, daß die achromatische Bildebene (BA) in eine dazu konjugierte achromatische Bildebene (BA') hinter dem weiteren einzelnen Ablenkensystem (16) abgebildet wird. Das weitere einfache Ablenkensystem (16) ist so erregt, daß das in der zur achromatischen Bildebene (BA) konjugierten Bildebene (BA') entstehende Bild wieder symmetrisch zur optischen Achse liegt. Durch das nachfolgende Projektivsystem (17, 18) wird dann das in der konjugierten Bildebene BA' entstehende Bild vergrößert in die hier nicht mehr dargestellte Registrierebene auf einen Leuchtschirm oder Bild-detektor abgebildet. Die Einstellung des Projektivsystems (17, 18) ist hier wiederum analog zu dem aus der US 4 812 652 bekannten Elektronenmikroskop.

Die durch das Doppelablenksystem (12, 13) bewirkte Auslenkung des Elektronenstrahls und die durch das einfache Ablenkensystem (16) bewirkte Zurückkipfung des Elektronenstrahls erfolgt dabei senkrecht zur Spektrumsrichtung und damit senkrecht zur Zeichenebene in Fig. 1a. Dieser Sachverhalt ist in der Fig. 1b vergrößert dargestellt. Bei einer Änderung der durch das Doppelablenksystem (12, 13) bewirkten Ablenkung des Elektronenstrahls wird gleichzeitig die Erregung der dispersiven Elemente (11a–11d) des Filters (11) geringfügig geändert. Dadurch wird ohne konstruktiven Zusatzaufwand erreicht, daß auch bei geringfügigen Fehljustierungen zwischen der senkrechten zur dispersiven Richtung des Filters (11) und der Ablenkrichtung des Doppelablenksystems (12, 13) die bewirkte Auslenkung senkrecht zur energiedispersiven Richtung erfolgt.

Die Blendenanordnung (14) ist in der Fig. 2 in Aufsicht dargestellt. Diese Blendenanordnung (14) ist im Elektronenmikroskop der Fig. 1a senkrecht zur Zeichenebene in Fig. 1a derart angeordnet, daß der die Richtung des Spektrums andeutende Pfeil in Fig. 2 in Dispersionsrichtung und damit parallel zur Zeichenebene in Fig. 1a ausgerichtet ist. Die Blendenanordnung weist eine einzige Öffnung (19) mit einer abgestuften Umrandung auf. Durch die abgestufte Umrandung entstehen Bereiche (19a–19g), die für unterschiedliche Energiebandbreiten auswählbar sind. Die Abstufung ist dabei in Spektrumsrichtung jeweils symmetrisch zu der Ebene, in der die optische Achse (OA) die Blendenanordnung (14) schneidet. Die Blendenanordnung selbst hat senkrecht zur Zeichenebene in Fig. 2 am Rand der Öffnung (19)

eine Dicke von 5  $\mu\text{m}$ , die mit dem Abstand von der Öffnung (19) auf 100  $\mu\text{m}$  zunimmt. Durch die relativ dicke Ausbildung in Entfernung von der Blendenöffnung (19) wird sichergestellt, daß Elektronen, die im Objekt (6) keinen Energieverlust erfahren haben, nicht durch die Blende transmittieren können. Gleichzeitig wird durch die relativ dünne Ausbildung im Bereich der Blendenöffnung (19) erreicht, daß sich die Blendenkanten genügend aufheizen, damit eine sich auf der Blendenanordnung ablagernde Verschmutzung abgebrannt wird. Die sinnvolle Abmessung der Bereiche (19a–19g) senkrecht zur energiedispersiven Richtung hängt von der Ausdehnung der Kaustik ab und beträgt zwischen 0,1 und 0,15 mm.

Die Abstufungen der Blendenöffnung (19) sind bezüglich ihrer Länge in Abhängigkeit von der Dispersion des Filters so ausgewählt, daß bei Einstellung des Elektronenstrahls auf die längste Blendenöffnung (19a) eine Energiebandbreite von 500 eV und bei Einstellung auf den kürzesten Blendenbereich (19g) eine Energiebandbreite von 4 eV realisiert wird.

In der Fig. 1c ist der Strahlengang eines vereinfachten Ausführungsbeispiels in einer zur Zeichenebene der Fig. 1a senkrechten Ebene dargestellt. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist auf das einfache Ablenkensystem (16) hinter der Transferlinse (15) verzichtet. Damit dennoch keine Bildverschiebung in der zur achromatischen Bildebene (BA) konjugierten achromatischen Bildebene (BA') auftritt, ist das Doppelablenksystem (12', 13') derart erregt, daß eine Auslenkung des Elektronenstrahls um einen virtuellen Kippunkt (K) erfolgt, der in der achromatischen Bildebene (BA) auf der optischen Achse liegt. Die Rücklenkung des Elektronenstrahls erfolgt dann ausschließlich durch die Transferlinse (15). Allerdings verläuft der Strahlengang bei dieser Anordnung in der Transferlinse (15) und auch im nachfolgenden Projektivsystem (17, 18) (siehe Fig. 1a) außeraxial, so daß hier von der eingestellten Energiebandbreite abhängige Abbildungsfehler auftreten können.

Das in der Fig. 1c dargestellte vereinfachte Ausführungsbeispiel läßt sich noch weiter vereinfachen, wenn die achromatische Bildebene (BA) hinter den dispersiven Elementen des Filters liegt und demzufolge zugänglich ist. In diesem Fall kann, wie in der Fig. 1c gestrichelt angedeutet ist, anstelle des Doppelablenksystems (12', 13') auch ein einfaches Ablenkensystem (12'') in der achromatischen Bildebene (BA) angeordnet sein.

Bei beiden Ausführungsformen nach der Fig. 1c ist die Blendenanordnung (14) entsprechend der Fig. 2 ausgebildet.

Das in der Fig. 3 dargestellte Ausführungsbeispiel ist bezüglich der Abbildungseigenschaften mit dem Ausführungsbeispiel nach den Fig. 1a und 1b vergleichbar. Dieses Ausführungsbeispiel enthält zusätzlich zur Transferlinse (15), die wiederum die Abbildung der achromatischen Bildebene (BA) in die dazu konjugierte achromatische Bildebene (BA') bewirkt, drei einzelne Ablenkensysteme (22, 23, 24), die alle in Strahlrichtung gesehen vor der Transferlinse (15) angeordnet sind. Das mittlere Ablenkensystem (23) ist dabei in der Spektrumsebene angeordnet. Das erste Ablenkensystem bewirkt eine Auslenkung des Elektronenstrahls entsprechend der ausgewählten Energiebandbreite, das mittlere Ablenkensystem (23) eine Rücklenkung des Elektronenstrahls auf die optische Achse und das dritte Ablenkensystem eine Kippung derart, daß der Elektronenstrahl hinter dem dritten Ablenkensystem (24) symmetrisch zur optischen Achse OA verläuft. Auch bei diesem Ausführungsbeispiel ist die Blendenanordnung (14) in der Spektrumsebene entsprechend der Fig. 2 ausgebildet.

In den Abb. 4a und 4b ist der Strahlengang eines Systems

zur variablen Spaltbreitenwahl dargestellt, das die achromatische Bildebene (BA) und das Spektrum im Abbildungsmaßstab 1 : 1 überträgt, wobei auch noch der Abstand (Helmholtzlänge) zwischen der achromatischen Bildebene und der Spektrumsebene erhalten bleibt. Dieses Ausführungsbeispiel weist in Strahlrichtung gesehen zunächst wieder ein Ablenkssystem (25) auf, das eine Kippung um die optische Achse (OA) in der achromatischen Bildebene (BA) bewirkt. Bei zugänglicher achromatischer Bildebene reicht dafür wieder ein einfaches Ablenkssystem aus. Sollte die achromatische Bildebene nicht zugänglich sein, ist das Ablenkssystem (25) als Doppelablenkssystem ausgebildet, das hinter der achromatischen Bildebene (BA) angeordnet ist und so erregt ist, daß ein virtueller Kippunkt um den Schnittpunkt der optischen Achse mit der achromatischen Bildebene resultiert. In der Spektrumsebene ist im Polschuhspalt einer ersten Transferlinse (26) die aus einer Spaltkante bestehende erste Blendenanordnung (27) angeordnet. Die Transferlinse (26) bildet die achromatische Bildebene (BA) in eine dazu konjugierte Ebene (BA') ab. In dieser konjugierten Ebene (BA') ist eine zweite Linse (29) und ein zweites Ablenkssystem (28) angeordnet. Die zweite Linse (29) wirkt dadurch gewissermaßen als Feldlinse und bildet die Spektrumsebene (S) in eine dazu konjugierte Spektrumsebene (S') ab. Die erste Spaltkante (27) dient zur Filterung entweder des oberen oder des unteren Ende des Spektrums während die zweite Spaltkante (30) zur Filterung am anderen Ende des Spektrums dient. In der Fig. 4a ist der Strahlengang dargestellt für den Fall, daß die Ablenkssysteme (25, 28) beide nicht erregt sind. Die erste Transferlinse (26) bewirkt aufgrund ihrer Anordnung in der Spektrumsebene lediglich eine Bilddrehung des Spektrums. Diese Linse überträgt die achromatische Bildebene (BA) im Abbildungsmaßstab 1 : 1 in die dazu konjugierte Ebene (BA') die zugleich mit der Hauptebene der zweiten Transferlinse (29) zusammenfällt. Bei nicht erregten Ablenkssystemen (25, 28) wird neben der Sollenergie  $E_0$  (durchgezogene Linie) der gesamte Energiebereich bis  $E_0 - \Delta E$  (gepunktete Linie) und  $E_0 + \Delta E$  (gestrichelte Linie) selektiert. Durch eine geeignete Erregung der Ablenkssysteme (25, 28) läßt sich eine beliebig kleinere Energiebandbreiten einstellen. Dieser Sachverhalt ist in der Fig. 4b veranschaulicht, in der der niederenergetische Bereich (gestrichelte Linie) teilweise durch die erste Spaltkante (27) und der höherenergetische Energiebereich (gestrichelte Linie) durch die zweite Spaltkante ausgefiltert wird.

Der in den Fig. 4a und 4b dargestellten Anordnung folgt wiederum ein Projektivsystem entsprechend der Fig. 1a nach, durch das entweder das Spektrum oder die achromatische Ebene in die Registrierebene abgebildet wird.

Bei dem in den Fig. 5a und 5b dargestellten alternativen Ausführungsbeispiel ist die erste Transferlinse (26) hinter der Spektrumsebene (S) so angeordnet, daß sich die Spektrumsebene (S) im vorderen Brennpunkt der Transferlinse (26) befindet. Gleichzeitig bildet die erste Transferlinse (26) wiederum die achromatische Bildebene (BA) in eine dazu konjugierte Ebene (BA') ab. Dieser konjugierten Ebene folgt eine zweite Transferlinse (29), die identisch zur ersten Transferlinse (26) erregt ist. In der Brennebene der zweiten Transferlinse (29) entsteht ein Bild (S') der Spektrumsebene. Gleichzeitig bildet die zweite Transferlinse (29) die zur achromatischen Bildebene (BA) konjugierte Ebene (BA') in die Ausgangsbildebene (BA'') ab. Durch die teleskopische Anordnung der beiden Linsen (26, 29) werden sowohl die Spektrumsebenen (S, S') mit dem Abbildungsmaßstab 1 : 1 als auch die achromatische Bildebene (BA) in die Ausgangsebene (BA'') im Abbildungsmaßstab 1 : 1 abgebildet.

Die Energiebreiteneinstellung erfolgt analog zum Aus-

führungsbeispiels nach den Fig. 4a und 4b durch entsprechende Erregung der beiden Ablenkssysteme (25 und 28) in der achromatischen Bildebene und in der dazu konjugierten Ebene (BA'). Durch eine Spaltkante (27) in der Spektrumsebene (S) wird wiederum der niederenergetische und durch eine zweite Spaltkante (30) in der zur Spektrumsebene (S) konjugierten Ebene (S') der höherenergetische Anteil des Spektrums herausgefiltert. Welche der beiden Spaltblenden (27, 30) dabei auf den niederenergetischen bzw. hochenergetischen Teil des Spektrums wirkt, ist dabei unwesentlich, da dieses nur davon abhängt, auf welcher Seite der optischen Achse die Spaltkanten (27, 30) angeordnet sind. Zu bemerken ist, daß bei der Anordnung nach den Fig. 5a und 5b die zur Spektrumsebene (S) konjugierte Ebene (S') und die achromatische Ausgangsebene (BA'') in der Reihenfolge gegenüber der achromatischen Bildebene (BA) und der Spektrumsebene (S) vertauscht sind. Durch diese Vertauschung von achromatischer Bildebene und Spektrumsebene ist dieses Ausführungsbeispiel insbesondere bei Energiefiltern mit hoher Dispersion vorteilhaft, da mit dem nachfolgenden Projektivsystem kleinere Vergrößerungen bei der Spektrumsabbildung ermöglicht werden.

Es ist offensichtlich, daß bei den Ausführungsbeispielen in den Fig. 4a, 4b und 5a, 5b die durch die Ablenkssysteme (25, 28) bewirkte Auslenkung des Elektronenstrahls in energiedispersiver Richtung des Filters erfolgt.

#### Patentansprüche

1. Energiefilter, insbesondere für ein Elektronenmikroskop, das eine Ausgangsbildebene (BA) und eine Dispersionsebene (S) aufweist, mit einer Blendenanordnung (14, 27, 30) zur Energieselektion in der Dispersionsebene (S) oder einer zur Dispersionsebene (S) konjugierten Ebene (S'), mindestens einem der Blendenanordnung (14, 27, 30) vorgeschalteten Ablenkssystem (12, 13; 12', 13'; 12'', 25), welches eine Ablenkung des Elektronenstrahls bewirkt und wobei die Einstellung unterschiedlicher Energiebandbreiten durch unterschiedliche Erregungen des Ablenkssystems (12, 13; 12', 13'; 12'', 25, 28) und daraus resultierende unterschiedliche Auslenkungen des Elektronenstrahls relativ zur Blendenanordnung (14, 27, 30) erfolgt.
2. Energiefilter nach Anspruch 1, wobei die Einstellung unterschiedlicher Energiebandbreiten durch Auslenkung senkrecht zur energiedispersiven Richtung des Filters (11, 12, 13, 14) erfolgt.
3. Energiefilter nach Anspruch 2, wobei bei einer Änderung der Erregung des Ablenkssystems (12, 13; 12', 13'; 12'', 25) eine Änderung der Erregung der dispersiven Elemente (11a-11d) des Filters erfolgt.
4. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1-3, wobei die Auslenkung um einen realen oder virtuellen Kippunkt (K) erfolgt, der mit dem Schnittpunkt der optischen Achse (OA) mit der Ausgangsbildebene (BA) zusammenfällt.
5. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1-4, wobei der Blendenanordnung (14) eine Transferlinse (15; 26) zur Abbildung der Ausgangsbildebene (BA) nachgeordnet ist.
6. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1-5, wobei der Blendenanordnung (14) ein weiteres Ablenkssystem (16; 24; 28) nachgeordnet ist.
7. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1-6, wobei die Blendenanordnung (14) eine oder mehrere Öffnungen (19) aufweist, die in Abhängigkeit von der Position senkrecht zur energiedispersiven Richtung unterschiedliche Öffnungslängen (19a-19g) aufweisen.

8. Energiefilter nach einem der Ansprüche 1–6, wobei dem zweiten Ablenkssystem (28) eine zweite Blendenanordnung (30) nachgeordnet ist.
9. Energiefilter nach Anspruch 8, wobei die erste und zweite Blendenanordnung (27, 30) als Spaltkanten ausgebildet sind. 5
10. Energiefilter nach Anspruch 8 oder 9, wobei das zweite Ablenkssystem (28) in einer zur Ausgangsbildebene (BA) konjugierten Ebene (BA') angeordnet ist.
11. Energiefilter nach einem der Ansprüche 8–10, wobei der zweiten Blendenanordnung (30) eine zweite Transferlinse (29) vorgeschaltet ist. 10
12. Elektronenmikroskop mit einem Energiefilter nach einem der Ansprüche 1–11, wobei dem Energiefilter (11–16) eine Anordnung aus mehreren Abbildungsstufen (5, 8, 9, 10) zur Variation der Vergrößerung der elektronenoptischen Abbildung vorgeschaltet ist. 15
13. Elektronenmikroskop nach Anspruch 12, wobei die Lagen der Eingangsbildebene und der Eingangscrossover-Ebene des Filters (11–16) unabhängig von der eingestellten Vergrößerung ortsfest sind. 20

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

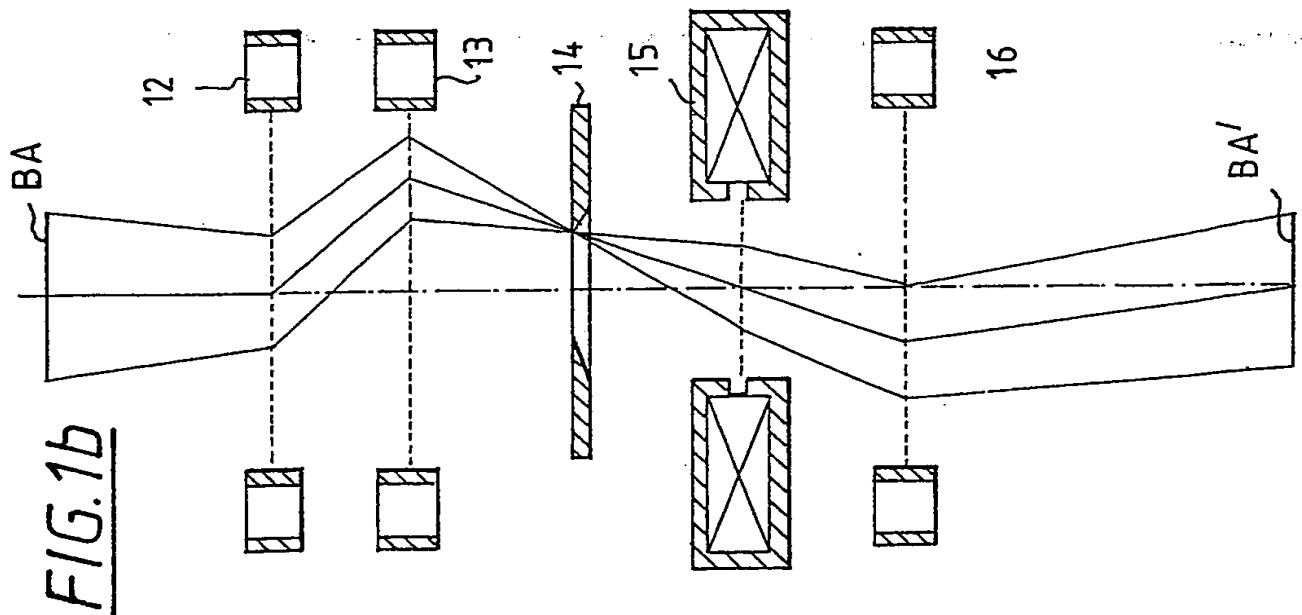
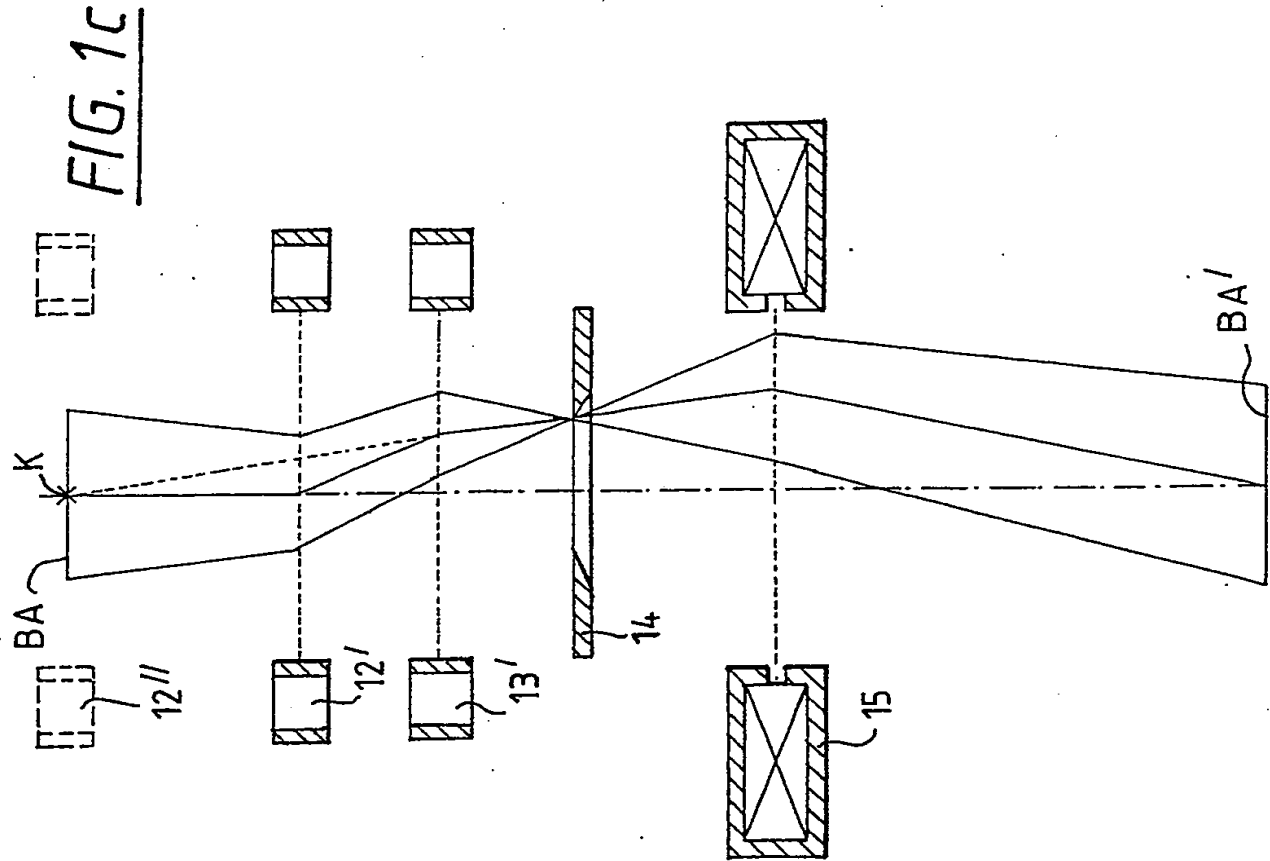


FIG. 5b

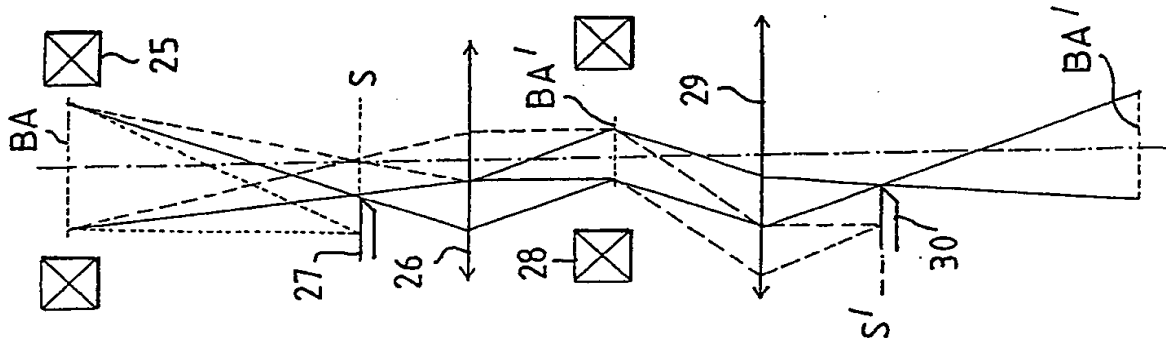


FIG. 5a

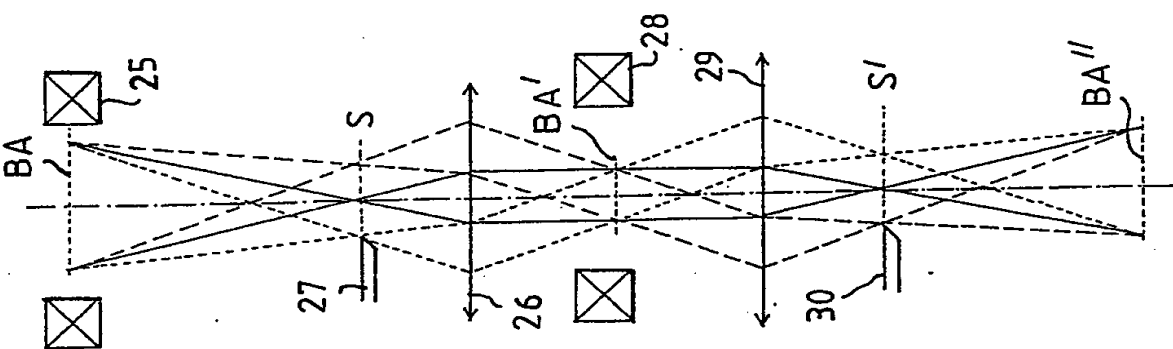


FIG. 4b

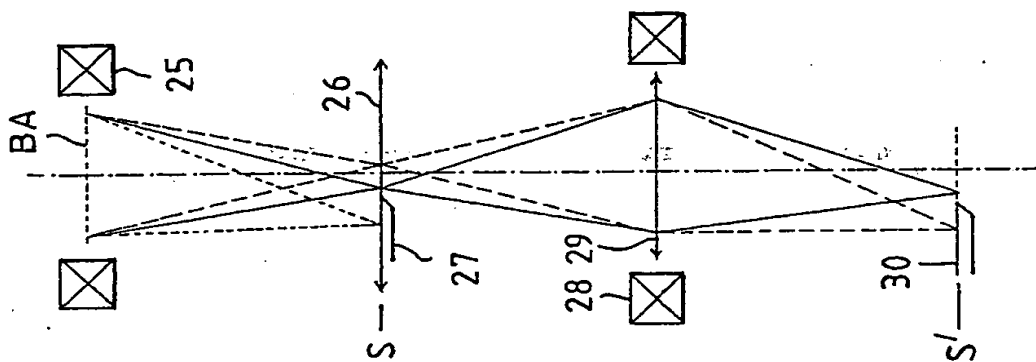


FIG. 4a

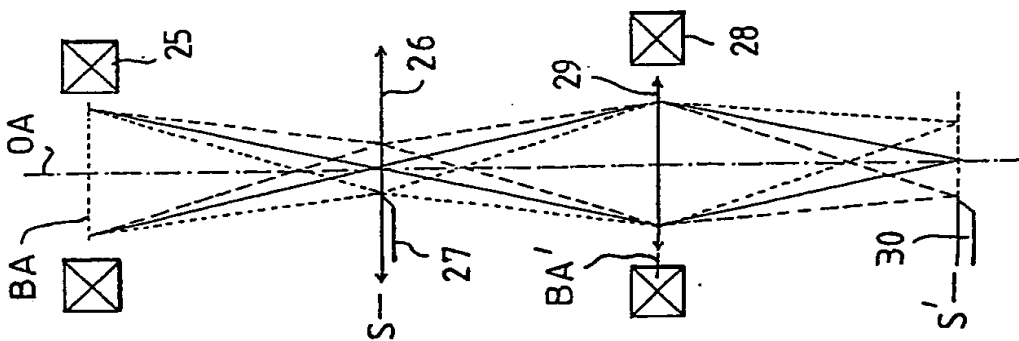


FIG. 1a

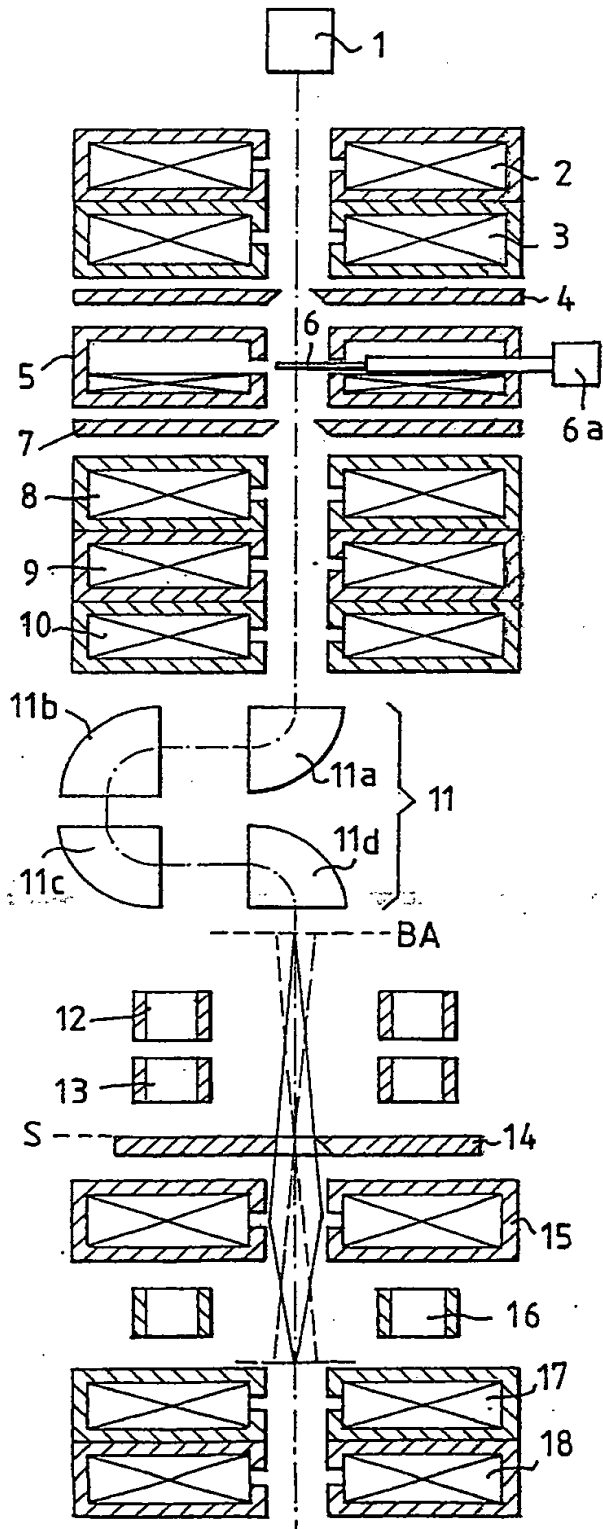


FIG. 2

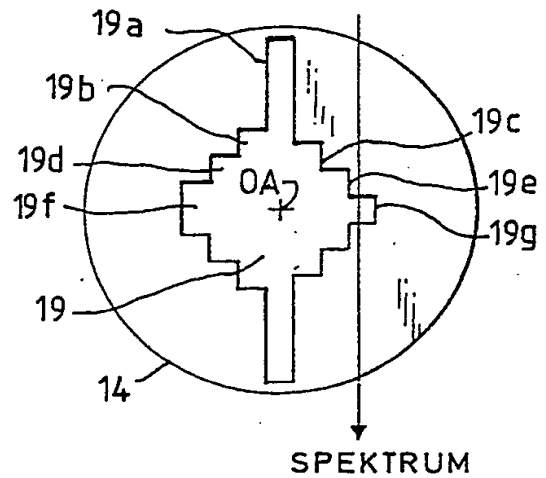


FIG. 3

